

가속열화된 CF-8M 및 CF-8A 주조 스테인리스강의 열취화 재료물성치 평가

김 철[†] · 박흥배* · 진태은* · 정일석**

Evaluation of Material Properties Considering Thermal Embrittlement for Accelerated aged CF-8M and CF-8A Cast Austenitic Stainless Steel

Cheol Kim, Heung-Bae Park, Tae-Eun Jin and Ill-Seok Jeong

Key Words : Thermal Embrittlement(열취화), Cast Austenitic Stainless Steel(주조 스테인리스강), Ferrite Content(페라이트 함량), Charpy Impact Energy(샤피 충격에너지), J-R Curve(J-R 선도)

Abstract

Cast austenitic stainless steel have been widely used for primary coolant piping in light water reactors. This material is subject to thermal embrittlement at reactor operating temperature. CF-8M and CF-8A cast austenitic stainless steel is used for several components, such as primary coolant piping, elbow, pump casing, and valve bodies in light water reactors. Thermal embrittlement results in spinodal decomposition of delta-ferrite leading to decreased fracture toughness. In this study, the specimens were prepared using an accelerated aging method. The measurement of ferrite content, Charpy impact test and J-R test were performed to verify the predicting equation for aged material properties. In case of above 25% ferrite content, predicted result of J-R curve might be non-conservative.

1. 서 론

원자력발전소의 각종 기기들은 고온, 고압 및 수산화 환경에서 장시간 사용됨에 따라 금속조직과 기계적 성질이 변하는 경년열화현상이 발생한다. 이러한 경년열화 발생기구로는 피로, 부식, 열취화, 중성자조사취화, 마모 등이 있으며 사용 재료나 운전환경에 따라 각각 다르게 나타난다. 주조 오스테나이트 스테인리스강(CASS, Cast Austenitic Stainless Steel)은 기계적 성질과 내식성

우수하여 배관, 펌프 케이싱, 밸브 몸체 등의 원자력발전소 1차측 압력경계 기기 재료로 많이 사용되고 있다. 이러한 1차측 압력경계 기기의 구조적 건전성 유지여부는 원전의 안전성에 큰 영향을 미치므로 원전의 수명 종료시점까지 충분한 건전성이 확보되어야 한다.

주조 스테인리스강으로 제작된 기기에서 발생하는 주요 경년열화기구인 열취화(thermal embrittlement)는 페라이트상에서 상변화가 발생하여 재료가 취화되는 현상으로서 그 결과 재료의 파괴인성과 충격강도가 저하된다.⁽¹⁾ 이와 같은 재료물성치의 변화는 주조 스테인리스강으로 제작된 기기의 피로균열성장률 가속시키며 임계 결함크기를 감소시킬 수 있으므로⁽²⁾ 열취화에 따른 재료물성치를 정확하게 예측하는 것은 중요하다.

지금까지 국내외에서 수행한 주조 스테인리스강의 열취화에 관한 연구로서, ANL의 Chopra⁽³⁾는 85종의 CASS에 대하여 290~400℃ 범위에서 최대

† 한국전력기술(주) 재료기술연구그룹

E-mail : chlkim@kopec.co.kr

TEL : (031)289-4682 FAX : (031)289-3189

* 한국전력기술(주) 재료기술연구그룹

** 전력연구원 원자력연구실

58,000시간까지 열화시킨 후 인장, 충격, 파괴인성 등의 재료물성치를 측정하고 분석하였다. 또한 Westinghouse⁽⁴⁾에서도 상당수의 주조 스테인리스강에 대하여 재료물성치를 측정, 분석하고 자체 데이터베이스를 구축하였으나 이를 공개하지는 않고 있다. 국내에서는 권재도, 박운원 등^(5,6)이 일부 CASS에 대하여 모의열화시킨 후 재료물성치 측정과 피로시험을 수행하여 열취화 영향을 평가한 바 있다. 그러나 지금까지 해외에서 수행한 열취화 관련 연구들은 그 결과 중 일부만 공개되고 있는 바, 국내 원전 사용재료인 CF-8M 및 CF-8A 주조 스테인리스강에 대한 열취화 재료물성치 평가를 위한 연구가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 가속열화된 CF-8M 및 CF-8A 주조 스테인리스강을 이용하여 페라이트 함량을 측정하고 샤프충격시험 및 J-R시험을 수행하여 열취화에 따른 재료물성치를 평가하였다. 또한 Chopra 등이 제안한 열취화 재료물성치 예측결과와 측정치를 비교 평가하였다.

2. 페라이트 함량

2.1 시험재료

국내 원전 주배관 재료로 사용된 바 있는 CF-8M 및 CF-8A 주조 스테인리스강을 시험재료로 선정하고 정적주조 방법으로 주괴(ingot)를 제작하였다. 주괴 제작시 CF-8M 재료는 높은 페라이트 함량을 보유하도록 하였으며 CF-8A 재료는 상대적으로 낮은 페라이트 함량을 보유하도록 하였다. Table 1은 제작한 주괴의 화학조성을 나타낸 것이다. 또한 원전 주배관은 290~320℃ 정도의 온도에서 사용되지만 열화에 따른 재료물성치를 평가하기 위해 400℃ 온도에서 가속열화시켰다. Arrhenius 식⁽⁷⁾을 이용하여 원전이 60년 동안 운전될 때와 동일한 열화가 발생하는 가속열화조건을 구하였으며 재료별 조건은 Table 2와 같다.

2.2 페라이트 함량 평가

열취화는 페라이트 함량이 높을수록 더 크게 발생하기 때문에 페라이트 함량을 정확히 평가하는 것은 매우 중요하다. 현재 페라이트 함량 평가에는 Aubrey^(1,3)가 제안한 예측식이나 페라이트의 자성을 이용한 자기측정법⁽⁸⁾이 많이 사용되고 있다. Aubrey는 금속조직의 각 화학성분과 페라

Table 1 Chemical compositions(wt%)

Grade	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P	Co
CF-8M	0.042	0.6	1.21	20.04	9.01	2.52	0.021	0.03	0.042
CF-8A	0.04	0.6	1.2	20.5	8.5	-	0.02	0.03	0.01

Table 2 Accelerated aging temperature and time

Grade	Accelerated aging temp (°C)	Accelerated aging time (hour)
CF-8M	400	5,359
CF-8A		7,886



Fig. 1 Measurement of ferrite content for CT specimen using FERITSCOPE MP30

이트 함량과의 상관관계를 분석하여 식 (1)과 같은 페라이트 함량(δ_c) 예측식을 제시하였다.

$$\delta_c = 100.3(Cr_{eq}/Ni_{eq})^2 - 170.72(Cr_{eq}/Ni_{eq}) + 74.22 \quad (1)$$

여기서,

$$Cr_{eq} = Cr + 1.21Mo + 0.48Si - 4.99$$

$$Ni_{eq} = Ni + 0.11Mn - 0.0086Mn^2 + 18.4N + 24.5C + 2.77$$

한편 질소(N)는 측정이 어려워 재료시험성적서에 제시되지 않은 경우가 많은데 이러한 경우 질소는 0.04wt%를 적용한다.

Fig. 1은 현재 널리 사용되고 있는 페라이트 함량 측정기인 FERITSCOPE MP30(독일 Fischer사)

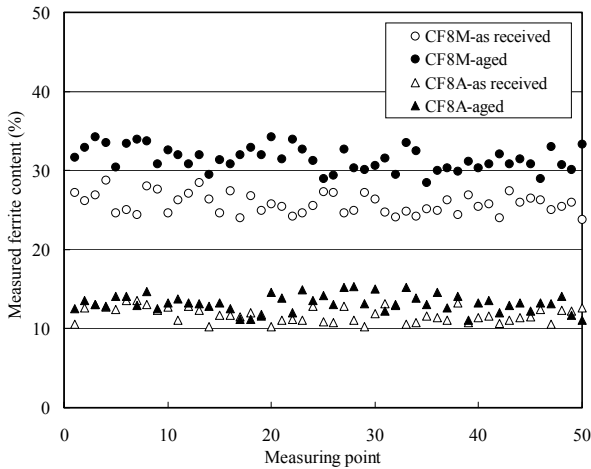


Fig. 2 Measured ferrite content using MP30

Table 3 Predicted and measured ferrite content

Grade	Predicted δ_c (%)	Measured δ_c (%)	
		As received	Aged
CF-8M	28.87	25.81	31.53
CF-8A	16.19	11.79	13.22

을 이용한 페라이트 함량 측정을 나타낸 것이다. FERITSCOPE MP30은 탐촉자를 접촉시킨 위치에서 도자율(magnetic permeability)을 측정하여 페라이트 함량을 측정하는 측정기로서, 휴대가 간편하여 실제 원자력발전소 현장에서도 활용이 가능하다.

Fig. 2는 CF-8M 및 CF-8A 건전재와 가속열화재에 대해 페라이트 함량 측정값을 보인 것이다. 페라이트 함량은 측정위치에 따라 차이가 있으므로 측정값의 신뢰성을 위하여 50 points씩 측정하여 평균을 구하였으며, 측정값의 표준편차는 1% 내외로서 양호한 측정 산포를 보였다. 또한 Table 3은 Fig. 2 측정값의 평균과 Aubrey 식을 이용한 예측값을 정리한 것으로서, 페라이트 함량 예측값은 건전재 시편에서의 측정값보다 높게 예측되었다. 한편 가속열화된 시편에서는 페라이트 함량이 약간 증가하였는데, 이는 시편 제조시 남아 있던 잔류 오스테나이트상이 자성을 띠는 마르텐사이트 상으로 변하여 페라이트 함량이 높게 측정된 것으로 판단된다.

3. 샤프 충격에너지

충격에너지 예측식으로부터 충격에너지를 구하고 건전재와 가속열화재의 충격에너지 측정값과 비교하였다. Chopra의 충격에너지 예측식⁽³⁾은 재료의 화학조성과 페라이트 함량을 이용하여 열취화에 따른 상온 포화 충격에너지 ($C_{V_{sat}}$)와 임의의 운전온도 및 운전시간에 따른 상온 충격에너지 (C_V)를 구할 수 있다.

CF-8M 주조 스테인리스강의 상온 포화 충격에너지는 식 (2)와 니켈의 함량에 따라 구분되는 식 (3)~(4)로 구한 값 중에서 작은 값을 선택한다.

$$\log_{10} C_{V_{sat}} = 7.28 - 0.011\delta_c - 0.185Cr - 0.369Mo - 0.451Si - 0.007Ni - 4.71(C + 0.4N) \quad (2)$$

Ni ≤ 10wt% 인 경우

$$\log_{10} C_{V_{sat}} = 1.10 + 2.12 \exp(-0.041\Phi) \quad (3)$$

Ni > 10wt% 인 경우

$$\log_{10} C_{V_{sat}} = 1.10 + 2.64 \exp(-0.064\Phi) \quad (4)$$

여기서, $\Phi = \delta_c(Ni + Si + Mn)^2(C + 0.4N)/5$

CF-3과 CF-8 주조 스테인리스강의 상온 포화 충격에너지는 식 (5)와 식(6)으로 구한 값 중에서 작은 값을 선택한다.

$$\log_{10} C_{V_{sat}} = 5.64 - 0.006\delta_c - 0.185Cr + 0.273Mo - 0.204Si + 0.044Ni - 2.12(C + 0.4N) \quad (5)$$

$$\log_{10} C_{V_{sat}} = 1.15 + 1.36 \exp(-0.035\Phi) \quad (6)$$

여기서, $\Phi = \delta_c(Cr + Si)(C + 0.4N)$

또한 임의의 운전온도 및 운전시간에 따른 상온 충격에너지는 화학조성, 상온 포화 충격에너지, 취화 속도론 등을 통해 식 (7)과 같이 예측할 수 있다.

$$\log_{10} C_V = \log_{10} C_{V_{sat}} + \beta [1 - \tanh\{(P - \theta)/\alpha\}] \quad (7)$$

여기서,

$$P = \log_{10}(t_{ser}) - \frac{1000Q}{19.143} \left(\frac{1}{T_{ser}} - \frac{1}{673} \right)$$

$$\alpha = -0.585 + 0.795 \log_{10} C_{V_{sat}}$$

$$\beta = (\log_{10} C_{V_{int}} - \log_{10} C_{V_{sat}}) / 2$$

식 (7)에서 β 계산에 필요한 $C_{V_{int}}$ 는 재료의 초기

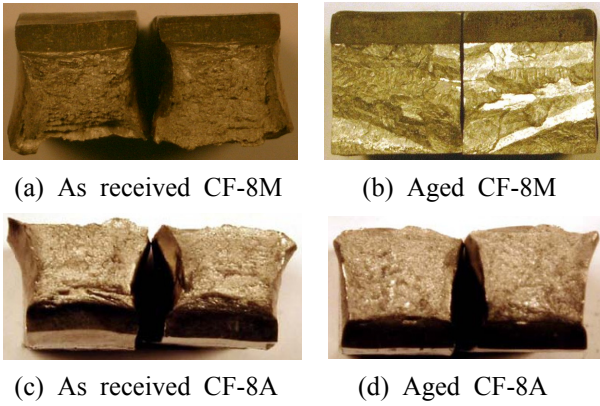


Fig. 3 Specimen after Charpy impact test

Table 4 Predicted and measured Charpy impact energy

Grade	Measured C_V (J/cm^2)				Predicted $C_{V_{sat}}$ (J/cm^2)
	As received		Aged		
	#1	#2	#1	#2	
CF-8M	203	203	22	20	28
CF-8A	272	331	127	232	58

샤피 충격에너지로서 이 값을 알 수 없는 경우에는 대표적인 값인 $200J/cm^2$ 을 적용한다. 한편 열화 계수(aging parameter) P의 계산에 필요한 활성화 에너지(Q)는 재료의 자기확산(self diffusion)에 필요한 에너지이다.

Fig. 3은 건전재와 가속열화재의 충격시험 후 파면을 보인 것이다. CF-8M의 경우 건전재에서는 소성변형이 수반되면서 파괴가 일어난 반면 열화시편에서는 열취화로 인하여 파단면이 완전히 평평한 벽개파괴가 일어난 것을 볼 수 있다. 반면, CF-8A의 경우에는 열화시편에서도 소성변형이 수반된 파면이 발생한 바, 충격에너지 저하가 크지 않음을 추측할 수 있다.

Table 4는 열취화된 경우의 충격에너지 측정값과 예측값을 비교하여 나타낸 것이다. 표에서 CF-8M의 경우에는 열취화에 의한 충격에너지 저하가 크게 발생한 것을 알 수 있다. 또한 CF-8M의 경우, 충격에너지 측정값이 예측값보다 낮게 측정되었으며, CF-8A의 경우에는 예측값이 측정값에 비하여 충분히 보수적으로 예측되었다.

5. 파괴저항선도 평가

Table 5 Constants for predicting the J-R curve

Index	Static Cast				Centrifugal Cast			
	R/T		290°C		R/T		290°C	
	a	b	a	b	a	b	a	b
CF-3 CF-8	49	0.52	102	0.28	57	0.52	134	0.28
CF-8M	16	0.67	49	0.41	20	0.67	57	0.41

Index	R/T		290°C	
	c	d	c	d
CF-3	0.15	0.16	0.17	0.12
CF-8	0.20	0.12	0.21	0.09
CF8M	0.23	0.08	0.23	0.06

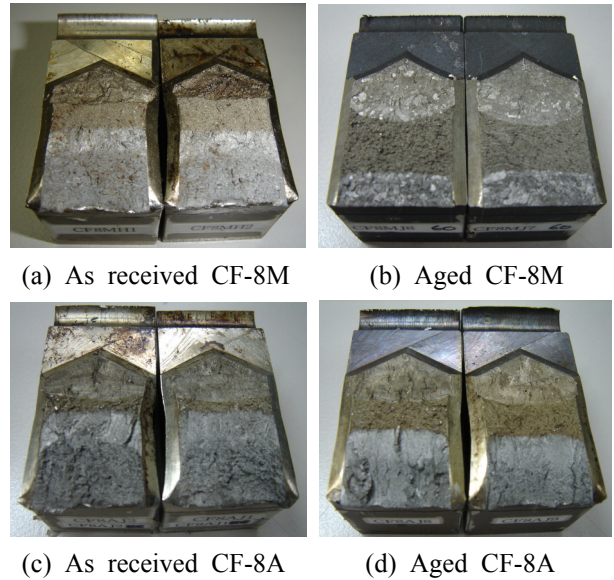


Fig. 4 Fracture surface after J-R test

Chopra는 충격에너지와 파괴인성 사이의 상관 관계를 구하고 포화 충격에너지를 이용하여 구조 스테인리스강의 열취화에 따른 포화 J-R선도 (saturated J-R curve) 예측식을 식 (8)과 같이 제시 하였다.⁽³⁾ 예측식은 재료와 구조방법을 고려하고 상온과 운전온도에서 각각의 J-R 선도를 구할 수 있으며 식 (8)에서 사용되는 상수들은 Table 5에 정리하였다.

$$J = a(C_{V_{sat}})^b(\Delta a)^n \tag{8}$$

여기서, $n = c + d(\log_{10} C_{V_{sat}})$

Fig. 4는 CF-8M 및 CF-8A 재료의 J-R 시험 후

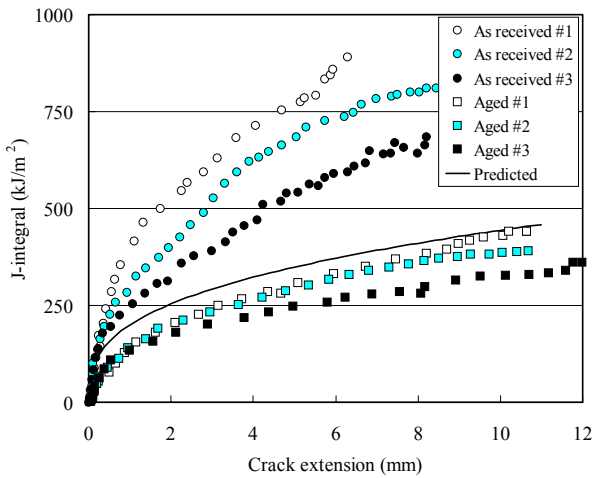


Fig. 5 Measured and predicted CF-8M J-R curve

파면을 보인 것으로서 열화된 CF-8M 재료에서는 취성파면과 유사한 파면이 나타난 바, 열취화가 크게 발생한 것을 알 수 있다. 또한 본 연구에서는 CF-8M 및 CF-8A 재료의 파괴저항시험 결과와 Chopra식을 이용한 예측결과를 비교하고 예측식의 보수성을 검토하였다. Fig. 5는 CF-8M 재료의 J-R 선도를, Fig. 6은 CF-8A 재료의 J-R 선도를 보인 것이다. Fig. 5의 CF-8M 재료의 경우에는 예측 선도가 가속열화재의 측정 결과보다 높아 비보수적으로 예측되었으나, Fig. 6의 CF-8A 재료에서는 예측결과가 측정치에 비하여 충분히 보수적으로 예측되었다.

이와 같은 측정 결과에 대한 Chopra의 자문 결과, Chopra의 파괴저항선도 예측식은 페라이트 함량 25% 이내인 데이터를 이용하여 구하였으므로 페라이트 함량이 25% 이내인 경우에 적절한 예측이 가능하다고 확인하였다.⁽⁹⁾ 따라서 CF-8M 재료에서 발생한 차이는 CF-8M 시편의 페라이트 함량이 28.8%로서 예측식의 적용범위를 벗어났기 때문인 것으로 판단된다. 또한 페라이트 함량이 25% 이내인 CF-8A 재료에서는 예측결과가 측정치에 비하여 충분히 보수적으로 예측된 것을 볼 수 있는 바, Chopra의 J-R선도 예측식은 페라이트 함량이 25% 이내인 경우에 적용하는 것이 바람직하다.

5. 결 론

본 연구에서는 가속열화된 CF-8M 및 CF-8A 주조 스테인리스강을 이용하여 페라이트 함량 측

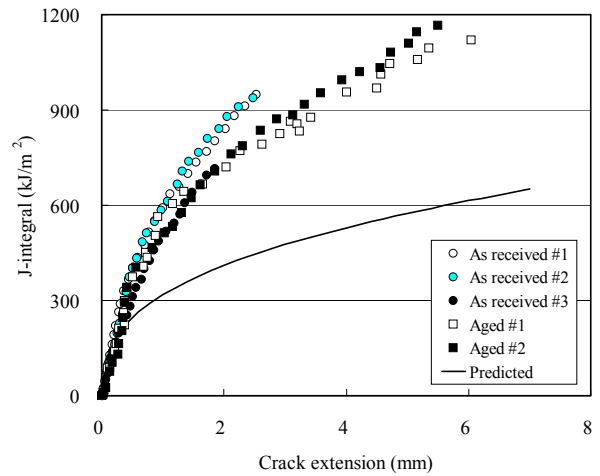


Fig. 6 Measured and predicted CF-8A J-R curve

정, 충격시험, J-R시험 등을 수행하고 Chopra 등이 제안한 열취화 재료물성치 예측결과와 측정치를 비교 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) FERITSCOPE MP30을 이용한 페라이트 함량 측정은 유용한 방법이며, Aubrey의 페라이트 함량 예측식은 건전재에서의 페라이트 함량 측정치에 비해 보수적으로 예측된다.

(2) 열취화에 의해 CF-8M 재료의 충격에너지 저하가 매우 크게 발생하며, CF-8A의 경우에는 충격에너지 예측값이 충분히 보수적이다.

(3) 예측값의 보수성 측면에서 Chopra의 J-R선도 예측식은 페라이트 함량이 25% 이내인 경우에 적용하는 것이 바람직하다.

후 기

본 연구는 원자력중장기 과제 일부로 수행한 ‘경년열화 손상평가 기술개발’과 관련하여 한국전력기술과 전력연구원의 공동연구에 의해 이루어졌으며 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Shah, V.N. and Macdonald, P.E., 1993, "Aging and Life Extension of Major Light Water Reactor Components", ELSEVIER, pp. 146~186.
- (2) USNRC, 1994, "Estimation of Fracture Toughness of CASS during Thermal Aging in LWR

- Systems," NUREG/CR-4513, Rev. 1, ANL.
- (3) Kim, C, Park, H. B., Jin T., E., and Jeong, I. S., 2004, "Evaluation of Fatigue Crack Growth for Cast Austenitic Stainless Steel Piping Considering Thermal Embrittlement," Proceeding of Material & Fracture Division, pp. 21-25.
- (4) Bamford, W. H., Kunka, M. K., et al, 1983, "The Effect of Thermal Aging on the Structural Integrity of Cast Stainless Steel Piping for Westinghouse Nuclear Steam Supply Systems," WCAP-10456, Westinghouse Electric Co.
- (5) Kwon, J. D., Park, J. C., Park, Y. W., et.al, 2000, "A Study on the 430°C Degradation Behavior of Cast Stainless(CF8M) I -Evaluation of Degradation Mechanism, Static and Fatigue Strength-," Transactions of the KSME, Vol. 24, No. 8, pp. 1910~1916.
- (6) Kwon, J. D., Ihn, J. H., Park, Y. W., et.al, 2000, "A Study on the 430°C Degradation Behavior of Cast Stainless(CF8M)III-Evaluation of Elastic-Plastic Fracture Toughness", Transactions of the KSME, Vol. 24, No. 10, pp. 2405~2412.
- (7) USNRC, 1981, "Interim Staff Position on Environmental Qualification of Safety-Related Electrical Equipment," NUREG-0588, ANL.
- (8) ASTM, 2001, "Standard Practice for Steel Casting, Austenitic Alloy, Estimating Ferrite Content Thereof" ASTM A800/A 800M-01.
- (9) KEPRI-KOPEC, 2004, "Development of Thermal Embrittlement Management Technology", Final Report, KEPRI.